

## ПРЕДЕЛ ТОЧНОСТИ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

**В.О. Гладышев, А.А. Терешин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: vgladyshev@mail.ru; arikalika@hotmail.com

*Рассмотрена задача определения зависимости фундаментальной точности координатно-временного обеспечения спутниковых систем позиционирования от процедуры синхронизации. С использованием преобразований координат и времени Мёллера смоделирован процесс регистрации космического сигнала искусственным спутником Земли и наземным наблюдателем в инерциальной системе отсчета, где реликтовое космическое излучение изотропно. Показано, что расчетные точности определения координат космического события в выбранной инерциальной и квазиинерциальной системах отсчета земного наблюдателя отличаются.*

**Ключевые слова:** специальная теория относительности, синхронизация, преобразования Мёллера, навигационные системы.

## ACCURACY LIMIT OF COSMIC SIGNAL SIMULTANEOUS REGISTRATION

**V.O. Gladyshev, A.A. Tereshin**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: vgladyshev@mail.ru; arikalika@hotmail.com

*The problem of determining the dependence of fundamental accuracy of coordinate-time support of satellite positioning systems on the synchronization process, is considered in the paper. Using the Moller-transformation of coordinates and time, the process of space signal registration by artificial Earth satellite, as well as by the ground-based observer in an inertial reference frame where the relic cosmic radiation is isotropic, is simulated. It is shown that the estimated accuracies of the coordinates definition of cosmic events in the earth observer's chosen inertial and quasi-inertial reference frames, differ.*

**Keywords:** special theory of relativity, synchronization, Moller-transformation, navigation systems.

**Введение.** Проверка основных положений специальной и общей теории относительности на космических расстояниях ведется достаточно давно и к настоящему времени все экспериментальные результаты свидетельствуют о ее справедливости.

Однако система обработки данных глобальных спутниковых систем навигации GPS основана не на строгих преобразованиях между инерциальными системами отсчета (ИСО), которые должны учитываться с позиции теории относительности. Это приводит к незначительным релятивистским эффектам, которые достаточно малы для наблюдателя, находящегося вблизи или на поверхности Земли. Вследствие постоянного ужесточения требований в отношении точности

позиционирования возникает необходимость модификации программного обеспечения спутников с учетом релятивистских эффектов [1].

Особый интерес уделяется проблеме измерения и корректировки времени на борту спутника на предельно возможном уровне. В качестве примера можно указать на эксперимент по измерению скорости нейтрино с помощью детектора OPERA. В эксперименте использован пучок мюонных нейтрино, создаваемый протонным суперсинхротроном (SPS) ЦЕРН в Женеве, направленный в подземную лабораторию Гран-Сассо (LNGS), где находится детектор OPERA, применяющийся для регистрации  $\tau$ -нейтрино, которые появляются от осцилляций мюонных нейтрино. Путь 732 км от ЦЕРН до лаборатории Гран-Сассо занимает у частиц примерно 3 мс. В экспериментах была обнаружена компонента скорости детектора порядка  $10^{-5}$  скорости света по направлению к источнику испускания нейтрино, расположенному в ЦЕРН. Это приводит к необходимости компенсации эффекта Доплера первого порядка малости, возникающего на навигационных приемниках. Для того чтобы корректировать бортовое время спутника, используя бортовые часы, предлагается ввести дополнительные релятивистские поправки [2].

Возможен и другой подход в описании подобных экспериментов. Он основан на предположении, что для фундаментальных взаимодействий, распространяющихся в пространстве независимых переменных, результаты измерительной процедуры, построенной на измерении частных дифференциалов преобразований, зависят от скорости лабораторной ИСО относительно пространства распространения взаимодействий [3, 4]. Использование этого подхода позволяет дать объяснение нарушения инвариантности на детекторе OPERA и в эксперименте по измерению времени регистрации нейтринного всплеска от SN1987A нейтринными и гравитационно-волновыми детекторами.

Переход на новый уровень точности измерений требует переоценки влияния на точность позиционирования релятивистских эффектов, связанных с выполнением принципа постоянства скорости света, принципа эквивалентности, эффекта Саньяка, замедления времени, гравитационного сдвига частот, процедуры синхронизации.

Корректное описание методов обеспечения синхронизации времени между бортовыми часами спутника GPS и часами, связанными с наземным наблюдателем, являются необходимым условием обеспечения высокой точности. Здесь можно указать на работы [5–7], в которых более детально рассмотрены релятивистские эффекты, влияющие на точность синхронизации времени и позиционирования. Особое внимание уделяется эффекту Саньяка, доплеровскому смещению первого порядка, гравитационному смещению частот и замедлению времени.

Специальные эксперименты по сравнению движения тестовых масс с различной структурой (массы расположены на спутнике, движущемся по свободной земной орбите [8]), могут дать основу для проверки фундаментальных положений СТО, в частности, более точную проверку принципа эквивалентности всех ИСО [9].

Математическая модель, на базе которой осуществляется обработка данных системой GPS, построена на предположении однородности и изотропности пространства.

Поиску нарушения изотропности односторонней скорости света посвящена работа [10]. В этой работе проведен последовательный анализ следующих экспериментов: измерения времени полета, полученные в Jet Propulsion Laboratory; эксперимент по резонансному поглощению двух фотонов; эксперимент по обнаружению ракетного гравитационного красного смещения, выполненного в Smithsonian Astrophysical Observatory–NASA; эксперименты Мессбауэра с ротатором. В том случае, если параметр анизотропии пропорционален произведению  $\alpha w$ , где  $w$  — скорость движения Земли относительно космического радиационного фона, то наилучшим ограничением на величину  $\alpha$  будет  $|\alpha| \leq 9 \cdot 10^{-8}$  [11].

В работе [12] было проведено сравнение полученных данных между водородными молекулярными часами, расположенными на поверхности Земли, и цезиевыми и рубидиевыми часами, находящимися на борту 25 спутников системы GPS. В специальной теории относительности синхронизация удаленных часов с помощью перемещения замедленных часов и синхронизации Эйнштейна идентичны для любой ИСО. Нарушение такой идентичности может быть смоделировано с учетом параметра  $\delta c/c$ , где  $c$  — скорость света;  $\delta c$  — отклонение скорости движения наблюдаемого сигнала от значения  $c$ , перемещающегося вдоль выбранного направления с измерительными часами, синхронизированными с помощью движения замедленных часов. В результате эксперимента была получена верхняя граница  $\delta c/c < 5 \cdot 10^{-9}$  для компоненты в экваториальной плоскости [13].

Большое значение для решения задач космической связи и навигации в околоземном пространстве имеет исследование вопроса о влиянии движения атмосферы на точность работы спутниковых систем обмена данными. Среди работ, посвященных распространению сигнала в атмосфере, можно отметить работу [14], в которой особое внимание уделяется теории распространения волн в среде со случайными неоднородностями показателя преломления, а также анализу экспериментальных данных по распространению радиоволн, света и звука в атмосфере.

Необходимо учесть, что не существует точных экспериментальных методов изучения влияния атмосферы на распространение электромагнитного излучения. Это обусловлено зависимостью атмосферы от многих параметров, контроль за которыми в режиме реального времени также достаточно сложен. В работе [15] проведено экспериментальное исследование возможности осуществления когерентной передачи данных в атмосфере. Исследования выполнены с помощью немецкого спутника TerraSAR-X, который обменивался данными с наземной станцией. Оценено влияние турбулентности на показатель преломления атмосферы.

Исследование, проведенное в работе [16], также посвящено проблеме когерентной и некогерентной передачи данных. Исследован вопрос влияния случайных наводок и ошибок на трассе распространения электромагнитного сигнала между спутниками и приемниками.

Большое влияние, которое оказывают атмосферные факторы на точность решения космических навигационных задач, определяет повышенный интерес к изучению влияния неоднородностей в атмосфере на распространение сигналов. В работе [17] изложен способ проведения расчетов распространения луча через оптическую турбулентность при передаче сигналов между высокорасположенными платформами. Расчеты проводились при моделировании эффектов турбулентности в чистой атмосфере на длинных горизонтальных стратосферных траекториях.

Использование лазерных систем связи в околоземном пространстве также требует проведения тестовых измерений в целях оценки влияния атмосферных эффектов на распространяемый сигнал. Влияние движения атмосферы накладывает фундаментальные ограничения на точность и воспроизводимость результатов измерений в атмосфере. Например, поле скоростей движения атмосферы влияет на направление распространения излучения, на длину оптической трассы и, соответственно, изменяет время распространения излучения и восстановленное положение излучающего объекта [18].

Для определения степени зависимости процессов когерентной передачи данных между орбитальными аппаратами и наземными станциями, а также космической навигации необходимо построить и исследовать математическую модель распространения электромагнитных сигналов в произвольных инерциальных системах отсчета для практически значимых процедур синхронизации. Далее такую модель можно будет расширить, добавив модель атмосферы с учетом эффектов оптики движущихся сред.

**Постановка задачи.** Решение проблемы повышения точности позиционирования в современных спутниковых системах навигации возможно на основе создания математической модели четырехмерных

преобразований координат и времени, осуществляемых между  $n$  ИСО с учетом эффектов электродинамики движущихся сред. В качестве первого приближения для таких преобразований предложено было взять преобразования координат и времени Мёллера [19]. Такая система уравнений может быть дополнена системой уравнений, описывающих среду с произвольным трехмерным распределением оптических свойств и с трехмерным полем скоростей [20].

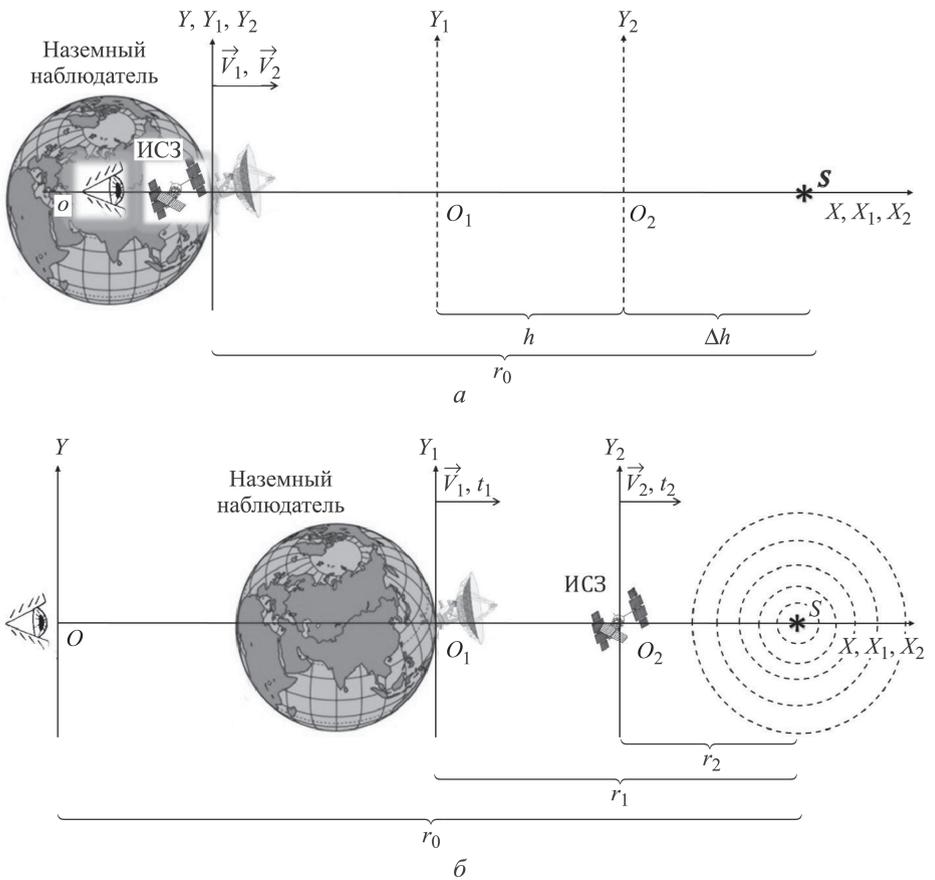
В настоящей работе за нулевое приближение рассмотрена одномерная задача описания процесса распространения электромагнитного сигнала от спутника, расположенного на земной орбите, до выбранной ИСО, связанной с наземным наблюдателем. Для проверки полученной математической модели предложено рассматривать процесс распространения сигнала для земного наблюдателя со стороны некоторого произвольного стороннего наблюдателя, связанного с неподвижной системой отсчета, относительно которой проводилась синхронизация времени в двух выбранных ИСО.

Если разрабатываемая математическая модель верна, то результаты расчетов относительно земного наблюдателя и выбранной системы отсчета должны совпадать с достоверной точностью, что и было продемонстрировано в настоящей работе. В перспективе эта математическая модель может быть использована для проверки новых идей по трехмерной навигации в пространстве.

Рассмотрим процесс распространения электромагнитного сигнала в космосе от удаленного источника в одномерном приближении. В качестве регистрирующих сигнал объектов выберем искусственный спутник Земли и земного наблюдателя, с которыми свяжем ИСО. Далее с учетом разных способов синхронизации систем будем осуществлять пересчет координаты удаленного источника из ИСО, связанной с наземным наблюдателем, в ИСО, связанную с искусственным спутником Земли (ИСЗ).

Зададим две подвижные ИСО (первую ИСО  $O_1X_1Y_1$  свяжем с наземным наблюдателем (З), вторую —  $O_2X_2Y_2$  с ИСЗ), а также некоторую неподвижную ИСО  $OXY$ , связанную со сторонним наблюдателем. Каждая система отсчета  $O_1X_1Y_1$  и  $O_2X_2Y_2$  обладает своей скоростью  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_2$  относительно ИСО  $OXY$ .

Для простоты рассмотрим одномерный случай, когда ИСО движутся вдоль оси  $OX$ . Вращением Земли и орбитальным движением спутника пренебрегаем, так как учет этих факторов приведет к влиянию неинерциальности движения, что на этом этапе рассмотрения приведет к усложнению понимания основного изучаемого эффекта, связанного с неидеальностью процедур синхронизации.



**Рис. 1.** Относительное положение источника сигнала  $S$ , наземного наблюдателя и ИСЗ в начальный момент времени  $t = 0$  (а) и в момент излучения сигнала (б)

Положения ИСЗ и наземного наблюдателя в начальный момент движения, когда все три ИСО совпадают, а также новые положения ИСО  $O_1X_1Y_1$  и  $O_2X_2Y_2$  (оси показаны штриховыми линиями) в момент излучения сигнала источником  $S$  приведены на рис. 1, а. Расстояние между наземным наблюдателем и ИСЗ обозначим через  $h$ , а расстояние между источником сигнала  $S$  и ИСЗ —  $\Delta h$  (здесь за координаты Земли и ИСЗ выбираем координаты соответствующих детекторов сигнала на земной поверхности и на борту ИСЗ). Эти величины являются заданными для момента излучения сигнала, который обозначим величиной  $t_0$ . Часы в подвижных ИСО в момент регистрации сигнала от источника  $S$  покажут значения времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно. Величина  $r_0$  характеризует положение источника сигнала  $S$  в неподвижной системе отсчета. Источник  $S$  является покоящимся в этой ИСО.

В начальный момент времени  $t_0 = 0$  Земля и ИСЗ находятся в начале координат  $OXY$  для проведения их синхронизации. В момент излучения сигнала источником  $S$  величина  $t_0$  определяется так, чтобы

Земля и ИСЗ находились на расстоянии  $r_1 = (h + \Delta h)$  и  $r_2 = \Delta h$  от источника сигнала. Это условие моделирует реальную задачу регистрации космического сигнала приемниками, установленными на борту ИСЗ и на земной поверхности. Другими словами, за время  $t_0$  расстояние между ИСЗ и Землей достигнет типичного для систем GPS значения  $h$ .

Положение Земли и ИСЗ, показанное на рис. 1, б, соответствует моменту времени  $(t_0 + \Delta h/c)$ , т.е. времени регистрации сигнала от источника детектором, установленным на ИСЗ.

Исходными данными для расчетов выбираем следующие параметры:  $t_0$ ;  $h$ ;  $\Delta h$ ;  $V_1$ .

Расстояние между неподвижной системой отсчета и источником сигнала  $S$  в момент времени  $t_0$  можно найти по выражению

$$r_0 = h + V_1 \left( t_0 + \frac{\Delta h}{c} \right) + \Delta h. \quad (1)$$

Скорость движения ИСЗ относительно исходной ИСО

$$V_2 = \frac{h + V_1 (t_0 + \Delta h/c)}{(t_0 + \Delta h/c)}. \quad (2)$$

Используя величины  $t_0$ ,  $h$ ,  $\Delta h$  и  $V_1$  и рассчитывая значения  $V_2$  и  $r_0$ , можно перейти к решению поставленной задачи определения зависимости фундаментальной точности координатно-временного обеспечения спутниковых систем позиционирования от процедуры синхронизации.

**Моделирование процесса регистрации сигнала в различных ИСО.** Для решения поставленной задачи воспользуемся обобщенными преобразованиями Лоренца, обеспечивающими переход от пространственно-временных координат  $(x, y, z, t)$  события  $S$  в одной ИСО к аналогичным координатам в другой.

Обобщенные преобразования Лоренца или преобразования Мёллера для ИСО  $O_1 X_1 Y_1$  и  $O_2 X_2 Y_2$  имеют следующий вид [19]:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + \vec{V}_1 \left[ \frac{\alpha_1}{V_1^2} (\vec{r}_0, \vec{V}_1) - \gamma_1 t_0 \right]; \quad (3)$$

$$t_1 = \gamma_1 t_0 - \gamma_1 \frac{(\vec{r}_0, \vec{V}_1)}{c^2}; \quad (4)$$

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_0 + \vec{V}_2 \left[ \frac{\alpha_2}{V_2^2} (\vec{r}_0, \vec{V}_2) - \gamma_2 t_0 \right]; \quad (5)$$

$$t_2 = \gamma_2 t_0 - \gamma_2 \frac{(\vec{r}_0, \vec{V}_2)}{c^2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1 = \gamma_1 - 1$ ;  $\gamma_1^{-2} = 1 - \beta_1^2$ ;  $\beta_1 = V_1/c$ ;  $\alpha_2 = \gamma_2 - 1$ ;  $\gamma_2^{-2} = 1 - \beta_2^2$ ;  $\beta_2 = V_2/c$ .

Преобразования (3)–(6) позволяют рассчитать координаты  $\vec{r}_{1,2}$  и  $t_{1,2}$  космического события  $S$  в двух произвольных движущихся ИСО на основе заданных координат  $\vec{r}_0$  и  $t_0$  при известных скоростях движения  $\vec{V}_1, \vec{V}_2$ . Полагаем, что ИСО  $O_1X_1Y_1$  и  $O_2X_2Y_2$  связаны с наземным наблюдателем и ИСЗ. Тогда с учетом начальных условий ( $t_0 = 1,6 \dots 360$  с,  $h = 19\,100$  км,  $\Delta h = 600$  км,  $c = 299\,792,458$  км/с,  $V_1 = 33$  км/с) с помощью системы уравнений (1)–(6) можно найти координаты  $\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1$  и  $t_2$ .

Однако наземной наблюдатель, имея данные своих наблюдений события  $(\vec{r}_1, t_1)$ , может рассчитать координаты события, которые должен зарегистрировать спутник. Обозначим эти расчетные координаты  $(\vec{r}'_2, t'_2)$  и запишем соответствующие расчетные выражения:

$$\vec{r}'_2 = \vec{r}_1 + \vec{V}_0 \left[ \frac{\alpha_0}{V_0^2} \left( \vec{r}_1, \vec{V}_0 \right) - \gamma_0 t_1 \right]; \quad (7)$$

$$t'_2 = \gamma_0 t_1 - \gamma_0 \frac{\left( \vec{r}_1, \vec{V}_0 \right)}{c^2}; \quad (8)$$

где  $\alpha_0 = \gamma_0 - 1$ ;  $\gamma_0^{-2} = 1 - \beta_0^2$ ;  $\beta_0 = V_0/c$ .

В систему (7), (8) входит значение относительной скорости движения  $\vec{V}_0$  одной ИСО относительно другой. Эта скорость определяется релятивистской формулой преобразования скоростей

$$\vec{\beta}_2 = a\vec{\beta}_0 + b\vec{\beta}_1. \quad (9)$$

Здесь  $a = \frac{\sqrt{1 - \beta_1^2}}{1 + (\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_0)}$ ;  $b = \frac{(\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_0) \left( 1 - \sqrt{1 - \beta_1^2} \right) + 1}{1 + (\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_0)}$ .

Относительную скорость найдем из (9)

$$\vec{v}_0 = \frac{c}{a} \left( \vec{\beta}_2 - b\vec{\beta}_1 \right). \quad (10)$$

Таким образом, уравнения (5), (6) позволяют рассчитать координаты  $(\vec{r}_2, t_2)$  события  $S$  путем пересчета из исходной ИСО, а уравнения (7), (8) и (10) — координаты  $(\vec{r}'_2, t'_2)$  из земной ИСО. Сравнение этих координат покажет, насколько результат расчета зависит от выбранной процедуры синхронизации.

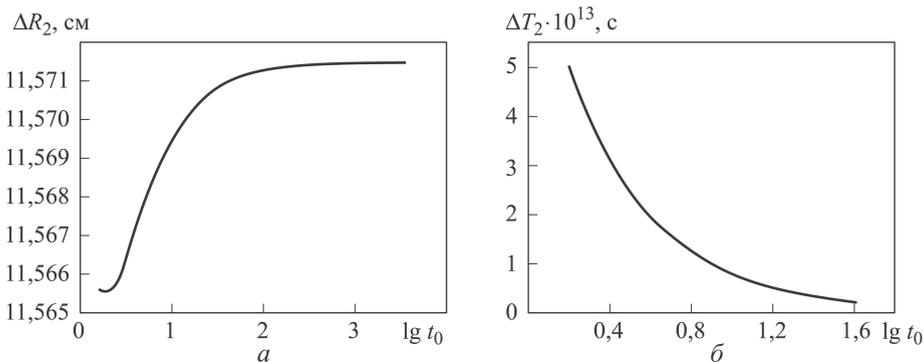
Расчетные значения погрешности определения пространственной и временной координат события  $S$  будем оценивать по формулам:  $\Delta R_2 = r_2 - r'_2$ ;  $\Delta T_2 = t_2 - t'_2$ . Следует отметить, что выбор исходной ИСО, а также положения источника сигнала  $S$  был достаточно произволен, это вносит некоторую неопределенность в ожидаемые

величины  $\Delta R_2$  и  $\Delta T_2$ . Поэтому погрешности  $\Delta R_2$  и  $\Delta T_2$  были вычислены при различных значениях момента излучения сигнала, что эквивалентно разным расстояниям до источника излучения.

**Численные результаты.** Для того чтобы оценить возможные погрешности при расчетах координат вектора  $r_2$  и соответствующего времени  $t_2$  регистрации события  $S$  расчеты проводились при различных значениях  $t_0$  и  $V_1$ .

Рассмотрим зависимость разности  $\Delta R_2$  пересчитанных значений координат события  $S$  из ИСО, связанной с наземным наблюдателем, в ИСО, связанную с ИСЗ, от времени синхронизации  $t_0$  двух ИСО (рис. 2, а). При построении этой зависимости использовались следующие значения: время синхронизации  $t_0 = 1,6$  с; скорость движения первой ИСО  $v_1 = 33$  км/с. Следует обратить внимание на крайнюю точку в левой части графика. Она соответствует точке перегиба, которая возникает ввиду того, что скорость движения  $V_2$  ИСЗ принимает значения, близкие к скорости света при малых значениях времени синхронизации  $t_0$ . Согласно зависимости, при значении времени синхронизации  $\lg t_0 = 2,5$  зависимость разности  $\Delta R_2$  от времени  $t_0$  выходит в насыщение. Это можно объяснить тем, что чем больше время синхронизации  $t_0$  двух ИСО, тем менее различимы выбранные способы синхронизации, т.е. скорость движения  $V_2$  ИСЗ становится равной скорости движения  $V_1$ .

Зависимость разности  $\Delta T_2$  пересчитанных значений времени регистрации события  $S$  ИСО, связанной с наземным наблюдателем, и ИСО, связанной с ИСЗ, от времени синхронизации  $t_0$  двух ИСО приведена на рис. 2, б. При построении этой зависимости использовались следующие значения: время синхронизации  $t_0 = 1,6$  с; скорость движения первой ИСО  $V_1 = 33$  км/с. Согласно указанной зависимости, погрешность определения времени нелинейно падает. Это связано с тем, что чем больше время синхронизации двух систем, тем менее

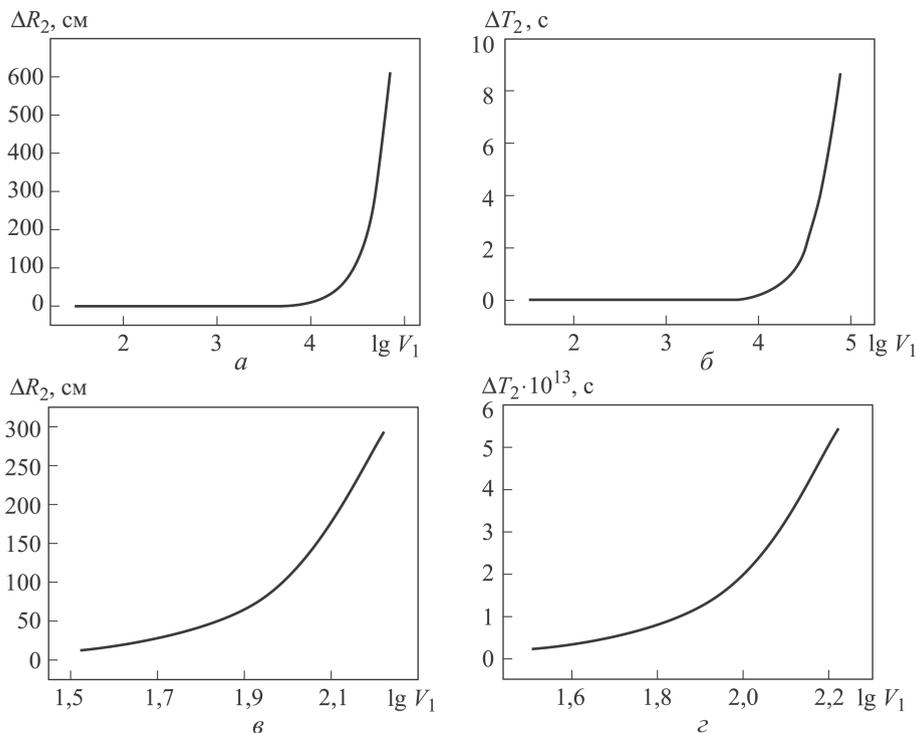


**Рис. 2.** Зависимости разностей  $\Delta R_2$  (а) и  $\Delta T_2$  (б) от времени синхронизации  $t_0$  двух ИСО

различимы эти системы при разных способах их синхронизации. Значения  $\Delta T_2 \approx 10^{-13}$  с сравнимы по порядку с точностью, которая обеспечивается современными спутниковыми системами навигации. Очевидно, что такая погрешность объясняется особенностью процедуры синхронизации. Однако реализуемая в действительности синхронизация часов на Земле и ИСЗ, основанная на обмене электромагнитными сигналами, проходящими через атмосферу Земли, обладает еще большей погрешностью.

Зависимости разности  $\Delta R_2$  пересчитанных значений координат события  $S$  из ИСО, связанной с наземным наблюдателем, в ИСО, связанную с ИСЗ, от скорости движения  $V_1$  системы, связанной с наземным наблюдателем, приведены на рис. 3, *a* и *в*. В этом случае время синхронизации было постоянным и равнялось  $t_0 = 360$  с, скорость движения первой системы —  $V_1 = 33$  км/с. С учетом этой зависимости при низких скоростях погрешность изменяется достаточно мало, но уже при приближении к релятивистским скоростям наблюдается резкий перегиб и увеличение погрешности расчета, что полностью соответствует теории.

Аналогичная зависимость наблюдается и при рассмотрении зависимостей разности  $\Delta T_2$  пересчитанных значений времени регистрации события  $S$  ИСО, связанной с наземным наблюдателем, и ИСО,



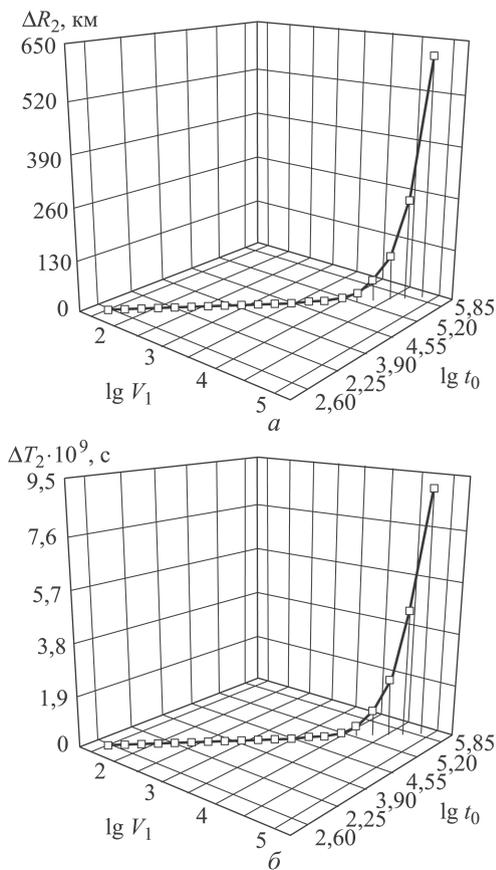
**Рис. 3.** Зависимости разностей  $\Delta R_2$  (*a*, *в*),  $\Delta T_2$  (*б*, *г*) от скорости движения  $V_1$  системы, связанной с наземным наблюдателем

связанной с ИСЗ, от скорости движения  $V_1$  системы, связанной с наземным наблюдателем (рис. 3, б, в). При тех же начальных значениях наблюдается та же форма кривой. Можно отметить, что оценка погрешности определения координат зависит от времени синхронизации  $t_0$ , поэтому интерес представляет определение значений  $t_0$ , при которых разность  $\Delta R_2$  существенна.

Зависимость разности  $\Delta R_2$  пересчитанных значений координат события  $S$  из ИСО, связанной с наземным наблюдателем, в ИСО, связанную с ИСЗ, от скорости движения  $V_1$  системы, связанной с наземным наблюдателем, и от времени синхронизации  $t_0$  двух ИСО представлена на рис. 4, а. Полученная зависимость идентична зависимостям, приведенным на рис. 3, а и в. Аналогичная кривая показана на рис. 4, б, но уже для зависимости разности  $\Delta T_2$  пересчитанных значений времени регистрации события  $S$  ИСО, связанной с наземным наблюдателем, и ИСО, связанной с ИСЗ, от скорости движения  $V_1$  системы, связанной с наземным наблюдателем, и от времени синхронизации  $t_0$  двух ИСО. Эта зависимость идентична зависимостям, представленным на рис. 3, б и в.

В соответствии с рассмотренными зависимостями погрешность  $\Delta R_2 \approx 100$  см возникает при скорости, близкой к скорости движения спутников относительно Земли:  $V_1 = 33$  км/с. Следовательно, результат измерений пространственных и временных координат события зависит от ориентации Земли, ИСЗ и космического источника излучения в пространстве, т.е. от времени года и времени земных суток.

**Выводы.** Полученное приближение математической модели процесса синхронной регистрации сигнала в квазиинерциальных системах отсчета позволяет решать задачи регистрации электромагнитных сигналов от удаленных источников излучения. Разработанная модель



**Рис. 4.** Зависимость разностей  $\Delta R_2$  (а) и  $\Delta T_2$  (б) от скорости движения  $V_1$  и времени синхронизации  $t_0$

дает возможность использовать систему уравнений, описывающих среду с произвольным трехмерным распределением диэлектрической и магнитной проницаемости, а также трехмерным законом движения среды на трассе распространения сигналов. На основе математической модели создан программный комплекс, позволяющий рассчитывать пространственные и временные параметры синхронной регистрации сигналов в различных ИСО от удаленных источников излучения.

Проведены численные модельные эксперименты по регистрации сигнала удаленного источника детекторами, установленными на движущемся по земной орбите спутнике, а также детекторами, связанными с наземным наблюдателем. Показано, что результаты расчетов, использующих общие преобразования Мёллера, с достаточной точностью совпадают со значениями, полученными с помощью преобразований Лоренца в частных случаях. Продемонстрировано, что в расчетной модели, в которой используется оценка времени и координат регистрации события, необходимо точно указывать, какая процедура синхронизации была применена, и при необходимости выполнять соответствующие поправки. Так, полученные значения разности времени  $\Delta T_2$  и координат  $\Delta R_2$  оказались равными  $\Delta T_2 \approx 10^{-15}$  с и  $\Delta R_2 \approx 10^{-2}$  м, что необходимо учитывать при когерентной передаче данных.

Согласно расчетам, процедура регистрации электромагнитного сигнала зависит от того, какая ИСО выбирается в качестве исходной, а также от того, какой будет выбранная процедура синхронизации.

В дальнейшем предполагается развитие математической модели с учетом влияния атмосферы Земли, дисперсии среды и неинерциальности земной система отсчета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Fliegel Henry F., Diesposti Raymond S.* GPS and Relativity: An Engineering Overview. GPS Joint Program Office. The Aerospace Corporation EI Segundo, California. P. 189–199.
2. *Van Erilburg Ronald A.J.* Measuring Time of Flight Using Satellite-Based Clocks. Department of Artificial Intelligence, Faculty of Mathematics and National Science. University of Groningen, 2011.
3. *Gladyshev V.O.* A Possible Explanation for the Delay in Detecting an Astrophysical Signal by Using Ground-Based Detectors // J. Moscow Phys. Soc. 1999. Vol. 9. No. 1. P. 23–29.
4. *Гладышев В.О.* О возможном отклонении регистрируемой скорости распространения фундаментальных взаимодействий от скорости света в вакууме // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2011. Том 8. № 1 (15). С. 179–189.
5. *Ashby Neil.* Relativity and the Global Positioning System // Physics Today. 2002. P. 41–47.
6. *Ashby Neil.* Relativistic Effects in the Global Positioning System. Department of Physics, University of Colorado, Boulder. 2006.

7. *Ashby Neil*. Relativistic Effects in the Global Positioning System. Department of Physics, University of Colorado, Boulder // 15th International Conference on General Relativity and Gravitation, 1997.
8. *Overduin J., Everitt F., Mester J., Worden P.* The Science Case for STEP. Gravity Probe B. Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford University, 2009.
9. *Testing Einstein's special relativity with Fermi's short hard  $\gamma$ -ray burst GRB090510* // A.A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, K. Asano, W.B. Atwood etc. // The Fermi LAT Collaboration.
10. *Will C.M.* Clock Synchronization and Isotropy of the One-Way Speed of Light // *Phys. Rev. D*. 1992. Vol. 45. P. 403–411.
11. *Wolf P., Petit G.* Satellite Test of Special Relativity Using the Global Positioning System // *Phys. Rev. A*. 1997. Vol. 56. P. 4405–4409.
12. *New test of Relativistic Time Dilation with Fast Optical Atomic Clocks* / S. Reinhardt, G. Saathoff, H. Buhr, L.A. Carlson, A. Wolf, D. Schwalm, S. Karpuk, Ch. Novotny, G. Huber, M. Zimmermann, R. Holzwarth, T. Udem, W.Th. Hansc, G. Gwinner, September 20, 2007.
13. *Erratum: New Methods of Testing Lorentz Violation in Electrodynamics* / M. Hohensee, A. Glenday, C.-H. Li, M.E. Tobar, P. Wolf // *Phys. Rev. D*. 2007. Vol. 75. P. 049902.
14. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
15. *Horwath J., David F., Knapek M., Perlot N.* Coherent Transmission Feasibility Analysis // in *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5712. P. 13–23.
16. *Chen C.C., Gardner C.S.* Impact of Random Pointing and Tracking Errors on the Design of Coherent and Incoherent Optical Inter-Satellite Communication Links // *IEEE Transactions on Communications*. 1989. Vol. 37. No. 3. P. 252–260.
17. *Numerical simulations of beam propagation through optical turbulence for high-altitude platform crosslinks* / J. Horwath, N. Perlot, D. Giggenbach, R. Jüngling // *Atmospheric Propagation II. Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 5338B.
18. *О влиянии вращения атмосфер Земли и Солнца на распространение электромагнитного излучения* / В.О. Гладышев, В.Л. Кауц, П.С. Тиунов, М.Б. Челноков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. Спецвыпуск “Необратимые процессы в природе и технике”*. 2012. С. 152–166.
19. *Тоннела М.-А.* Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: Изд-во ин. лит., 1962. 485 с.
20. *Гладышев В.О., Тиунов П.С.* Математическое моделирование процессов синхронной регистрации сигналов детекторами, движущимися в различных квазиинерциальных системах отсчета // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2010. № 2. С. 16–30.

## REFERENCES

- [1] *Fliegel Henry F., Diesposti Raymond S.* GPS and Relativity: An Engineering Overview. GPS Joint Program Office. The Aerospace Corporation EI Segundo, California, pp. 189–199.
- [2] *Van Erlburg Ronald A.J.* Measuring Time of Flight Using Satellite-Based Clocks. Department of Artificial Intelligence, Faculty of Mathematics and National Science. University of Groningen, 2011.
- [3] *Gladyshev V.O.* A Possible Explanation for the Delay in Detecting an Astrophysical Signal by Using Ground-Based Detectors. *J. Moscow Phys. Soc.*, 1999, vol. 9, no. 1, pp. 23–29.
- [4] *Gladyshev V.O.* Possible Deviation of Registered Propagation Speed of Fundamental Interactions from Light Speed in Vacuum. *Giperkompleksnyye chisla v geometrii i fizike* [Hypercomplex Numbers in Geometry and Physics], 2011, no. 1 (15), vol. 8, pp. 179–189 (in Russ.).

- [5] Ashby Neil. Relativity and the Global Positioning System. *Physics Today*, 2002, pp. 41–47.
- [6] Ashby Neil. Relativistic Effects in the Global Positioning System. Department of Physics, University of Colorado, Boulder, 2006.
- [7] Ashby Neil. Relativistic Effects in the Global Positioning System. Department of Physics, University of Colorado, Boulder. *15th International Conference on General Relativity and Gravitation*, 1997.
- [8] Overduin J., Everitt F., Mester J., Worden P. The Science Case for STEP. Gravity Probe B. Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford University, 2009.
- [9] Abdo A.A., Ackermann M., Ajello M., Asano K., Atwood W.B. etc. Testing Einstein's special relativity with Fermi's short hard  $\gamma$ -ray burst GRB090510. The Fermi LAT Collaboration.
- [10] Will C.M. Clock synchronization and isotropy of the one-way speed of light. *Phys. Rev. D.*, 1992, vol. 45, pp. 403–411.
- [11] Wolf P., Petit G. Satellite test of special relativity using the global positioning system. *Phys. Rev. A.*, 1997, vol. 56, pp. 4405–4409.
- [12] Reinhardt S., Saathoff G., Buhr H., Carlson L.A., Wolf A., Schwalm D., Karpuk S., Novotny Ch., Huber G., Zimmermann M., Holzwarth R., Udem T., Hansc W.Th., Gwinner G. New test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks. September 20, 2007.
- [13] Hohensee M., Glenday A., Li C.-H., Tobar M.E., Wolf P. Erratum: New methods of testing Lorentz violation in electrodynamics. *Phys. Rev. D.*, 2007, vol. 75, p. 049902.
- [14] Tatarskiy V.I. Rasprostraneniye voln v turbulentsnoy atmosfere [Wave propagation in turbulent atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 548 p.
- [15] Horwath J., David F., Knapik M., Perlot N. Coherent transmission feasibility analysis. *In Proc. SPIE*, 2005, vol. 5712, pp. 13–23.
- [16] Chen C.C., Gardner C.S. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical inter-satellite communication links. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, vol. 37, no. 3, pp. 252–260.
- [17] Horwath J., Perlot N., Giggenbach D., Jangling R. Numerical simulations of beam propagation through optical turbulence for high-altitude platform crosslinks. *Atmospheric Propagation II. Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5338B.
- [18] Gladyshev V.O., Kauts V.L., Tiunov P.S., Chelnokov M.B. Revisiting the influence of the Earth and Sun atmospheres rotation on propagation of electromagnetic radiation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki., Spetsvyv.* “Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike” [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci., Spec. Issue “Irreversible processes in nature and in engineering practice”], 2012, pp. 152–166 (in Russ.).
- [19] Tonnela M.-A. Osnovy elektromagnetizma i teorii otnositel'nosti [Fundamentals of electromagnetism in relativity theory]. Moscow, Inostr. Liter. Publ., 1962. 485 p.
- [20] Gladyshev V.O., Tiunov P.S. Mathematical simulation of processes of the signal synchronous registration by detectors moving in different quasi-inertial frames of reference. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2010, no. 2, pp. 16–30 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2014

Гладышев Владимир Олегович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан факультета “Фундаментальные науки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 131 научной работы и двух монографий в области электродинамики движущихся сред.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gladyshev V.O. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, dean of the Faculty “Fundamental Sciences” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 131 publications and two monographs in the field of electrodynamics of moving media.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Терешин Александр Андреевич — студент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор трех научных работ в области математического моделирования.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Tereshin A.A. — student of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of three publication in the field of mathematical simulation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.